Università degli Studi di Trento

Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale Meccanica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Memorie della Tesi di Laurea

Sviluppo di soluzioni costruttive prefabbricate per la realizzazione di solai composti acciaio-legno

Relatori:
Prof. Ing. Maurizio Piazza
Prof. Ing. Riccardo Zandonini

Correlatore:
Ph.D. Ing. Cristiano Loss

Laureando:
Matteo Pangrazzi

Anno Accademico 2014/2015

Indice

1 Introduzione **1**

2 Implementazione di solai composti acciaio-legno **3**
2.1 Caratteristiche degli elementi del sistema 3
2.2 Verifiche imposte dalla normativa 4

3 Risultati delle prove sperimentali **5**
3.1 Descrizione del setup di prova 6
3.2 Descrizione dei campioni e fasi di montaggio 8
3.3 Elaborazione dei dati ottenuti dalla prova sperimentale 9
3.4 Confronto dei risultati sperimentali 12

4 Modellazione numerica **14**
4.1 Confronto con i risultati sperimentali 14

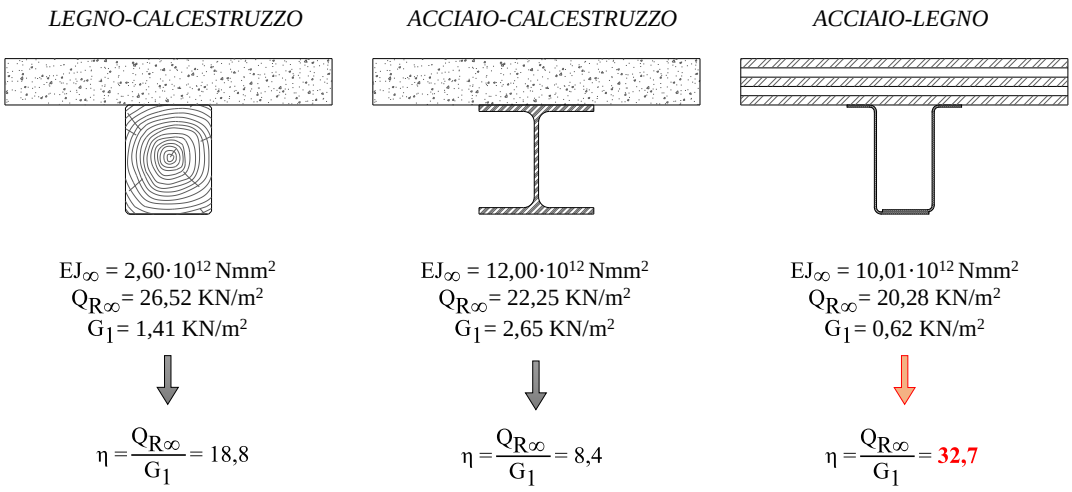
5 Conclusioni **16**

Sommario

La tesi tratta un'innovativa tecnologia costruttiva, sviluppata per la realizzazione di solai composti a soletta collaborante in CLT e travi in acciaio. In particolare, viene implementata una soluzione costruttiva leggera e allo stesso tempo resistente, capace di rispondere perfettamente ai moderni standard di sostenibilità ambientale ed efficienza energetica. Lo studio riguarda la valutazione del comportamento flessionale di elementi prefabbricati, realizzati utilizzando differenti soluzioni di collegamento. Vengono presentati i risultati delle prove di laboratorio effettuate su campioni in scala reale, proponendo inoltre un modello FEM, in grado di replicare l'effettivo comportamento osservato in fase sperimentale.

1 Introduzione

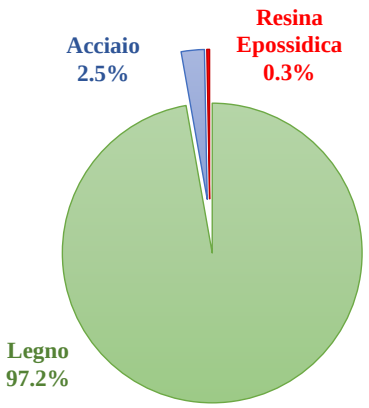
Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo principale lo studio del comportamento flessionale di innovativi sistemi composti acciaio-legno per la realizzazione di solai prefabbricati. Questa tecnologia costruttiva, che prevede l'accoppiamento di profili metallici a dei pannelli di legno in CLT, permette di ottenere un unico elemento strutturale altamente efficiente, capace di combinare in maniera ottimale le intrinseche proprietà di leggerezza e resistenza dei singoli materiali. Lo scopo della ricerca è quello di fornire una soluzione alternativa alle già esistenti tipologie di solai composti, in grado di assicurare notevoli vantaggi e migliorie. Infatti, in termini di capacità portante, viene ridotto notevolmente il peso dell'intera struttura, limitando e rendendo più sostenibile l'uso delle materie prime. Questo processo comporta notevoli vantaggi, sia dal punto di vista statico, contenendo i carichi agenti in fondazione, sia dal punto di vista dinamico, riducendo gli effetti sismici sull'intera costruzione. Nella seguente immagine si è cercato di effettuare un confronto in termini capacitivi tra le due tipologie di solaio composto maggiormente conosciute (legno-calcestruzzo e acciaio-calcestruzzo) e l'innovativa soluzione in esame. È stata considerata la condizione ideale di connettore infinitamente rigido, mantenendo inalterata la geometria del sistema (altezza del pacchetto di solaio e luce di libera inflessione).



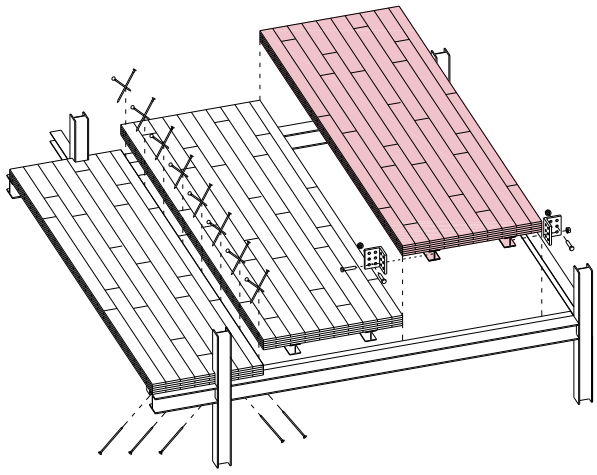
Si osserva che i tre sistemi manifestano una capacità portante comparabile, ma il notevole vantaggio garantito dalla soluzione acciaio-legno risulta essere appunto la grande leggerezza.

Al fine di ottenere dei sistemi composti in grado di assicurare alte prestazioni nel breve e nel lungo periodo, è indispensabile utilizzare un sistema di connessione in grado di rendere collaboranti i due elementi. I collegamenti giocano un ruolo fondamentale nel comportamento complessivo della struttura, limitando gli spostamenti relativi che possono manifestarsi all'interfaccia tra i singoli elementi e impedendo il loro distacco in corrispondenza del piano di scorrimento. A seguito di un'accurata fase progettuale, sono state indicate tre diverse soluzioni di collegamento, le quali prevedono l'utilizzo di due differenti tecnologie: la prima realizzata completamente a secco, attraverso l'applicazione di viti a tutto filetto disposte in maniera inclinata rispetto all'asse della trave, la seconda basata sull'utilizzo di piastre metalliche forate, predisposte in corrispondenza del lembo superiore della trave e collegate al pannello in CLT per mezzo di una speciale resina epossidica. Entrambe le tecniche di assemblaggio, pur essendo di natura differente, garantiscono una perfetta collaborazione tra i due elementi del sistema e permettono una notevole velocità di montaggio.

Il generico elemento di solaio, realizzato utilizzando travi in acciaio a sostegno di una soletta lignea, presenta un'elevata modularità e flessibilità architettonica, dando la possibilità di ottenere una soluzione costruttiva replicabile e adattabile, in grado di garantire il soddisfacimento degli attuali requisiti di efficienza energetica. Notevole attenzione è stata posta nei confronti della sostenibilità ambientale: grazie all'elevata reversibilità del sistema, risulta infatti possibile riciclare o riutilizzare gran parte degli elementi con cui esso è composto. Tale aspetto viene incentivato soprattutto attraverso l'uso del legno, un materiale naturale che può essere lavorato completamente a secco, e, se proveniente da foreste gestite in maniera sostenibile, consente di prolungare il ciclo di vita del carbonio, riducendo di conseguenza le emissioni di anidride carbonica. In termini volumetrici, infatti, il legno costituisce circa il 97% dell'intero sistema, mentre l'aliquota di materiale non rinnovabile, costituito essenzialmente dalla resina epossidica utilizzata per la realizzazione di alcuni sistemi di collegamento, è limitata allo 0.3%.



(a) Materiali componenti il solaio

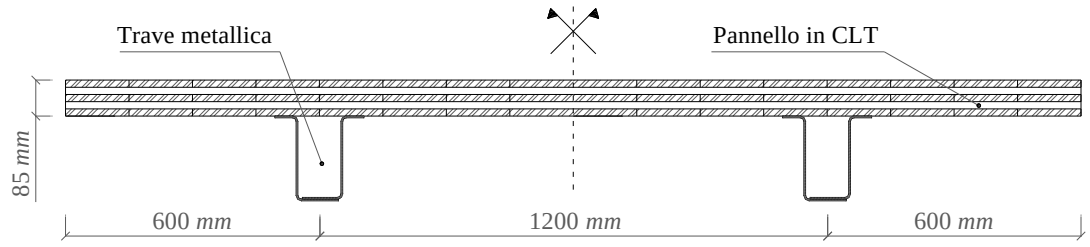


(b) Schema di montaggio in opera

Questo tipo di strutture composte, realizzate accoppiando acciaio e legno, rappresentano un'assoluta novità nel campo delle costruzioni civili e, ad oggi, non si conoscono soluzioni specifiche in grado di prevedere in maniera accurata la loro risposta in termini ingegneristici. Questo studio tratta nello specifico il comportamento fuori piano di tale soluzione costruttiva, cercando di stabilire se i principali modelli di calcolo analitici, reperibili in letteratura, possano essere applicati allo specifico caso in esame. Inoltre, verrà proposta una simulazione numerica basata su analisi statiche non lineari, con l'intento di replicare il reale comportamento osservato sperimentalmente.

2 Implementazione di solai composti acciaio-legno

Ogni campione di solaio è composto da due profili metallici piegati a freddo, realizzati attraverso l'uso di acciaio di tipo $S355$ e aventi una lunghezza pari a $l = 600\,cm$. Questi elementi presentano una geometria leggermente differente in relazione al sistema di collegamento adottato. Essi rappresentano gli elementi portanti dell'intero elemento composto e vengono resi collaboranti con un pannello in CLT, realizzato con legno di *Classe C*24, avente dimensioni in pianta pari a $L \times B = 584\,cm \times 240\,cm$ ed uno spessore $s = 85\,mm$.



La progettazione di questi elementi si basa essenzialmente sul soddisfacimento delle verifiche in esercizio imposte dalla vigente normativa. Dunque, la scelta dei materiali e la definizione dei differenti sistemi di collegamento, è stata effettuata in maniera tale da garantire una riserva abbastanza ampia dei limiti imposti sulla freccia di inflessione.

2.1 Caratteristiche degli elementi del sistema

Grazie alla perfetta simmetria del sistema risulta possibile studiare solamente una parte di solaio composto, caratterizzato da una singola trave metallica di altezza pari ad $h = 200\,mm$ e da una porzione di pannello in CLT di larghezza pari a $b = 1200\,mm$. Le principali proprietà geometriche di questi elementi vengono riportate nella tabella sottostante.

	Pannello in CLT		**Trave metallica**	
Altezza	h_1	$85.0\,mm$	h_2	$200.0\,mm$
Larghezza	b_{ef}	$1017.0\,mm$	b_2	$210.0\,mm$
Baricentro	$y_{G,1}$	$42.5\,mm$	$y_{G,2}$	$88.4\,mm$
Area	A_1	$51866.8\,mm^2$	A_2	$2660.1\,mm^2$
Momento d'inerzia	J_1	$1249130.3\,mm^4$	J_2	$14859053.8\,mm^4$
Modulo di resistenza	W_1	$29391.3\,mm^3$	$W_{2,SUP}$ $W_{2,INF}$	$133004.1\,mm^3$ $168315.0\,mm^3$

Esclusivamente per la fase di verifica, come sistema di collegamento per rendere collaborante la trave metallica e il pannello in CLT, vengono considerate delle viti inclinate a $\pm 45°$, le cui caratteristiche prestazionali sono state stimate attraverso precedenti campagne sperimentali. Da questi parametri, sulla base delle indicazioni fornite in parte dai produttori ed in parte dalla vigente normativa europea, è stato possibile stimare l'effettiva rigidezza in esercizio del generico collegamento, combinando opportunamente la rigidezza laterale e assiale.

$$K_{ser} = K_{ser,v} \cdot \sin\alpha + K_{ser,ax} \cdot \cos\alpha = 13841.2\,N/mm$$

Per questi connettori è stato necessario stimare un interasse equivalente, al fine di rendere più agevole il processo di verifica:

$$s_{eq} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} = 225\,mm$$

2.2 Verifiche imposte dalla normativa

Di seguito vengono riportati i risultati relativi alle verifiche di resistenza per le sollecitazioni a breve e a lungo termine, ottenuti attraverso l'applicazione della *teoria delle travi composte* di Newmark.

	Verifica a $t = 0$		**Verifica a $t = \infty$**	
E_1	12000	N/mm^2	7500	N/mm^2
$E_1 J_1$	$1.499\,10^{10}$	Nmm^2	$9.368\,10^{9}$	Nmm^2
$E_1 A_1$	$6.224\,10^{8}$	Nmm^2	$3.890\,10^{8}$	Nmm^2
K_u	13841.2	N/mm	8650.8	N/mm
Caratteristiche del sistema composto				
$(EJ)_0$	$3.135\,10^{12}$	Nmm^2	$3.130\,10^{12}$	Nmm^2
$(EA)_0$	$2.994\,10^{8}$	N	$2.293\,10^{8}$	N
$(EJ)_\infty$	$1.013\,10^{13}$	Nmm^2	$8.575\,10^{12}$	Nmm^2
γ_1	0.25		0.25	
a_1	120.7	mm	131.3	mm
a_2	33.4	mm	22.8	mm
$(EJ)_{ef}$	$6.014\,10^{12}$	Nmm^2	$5.088\,10^{12}$	Nmm^2
η	0.412		0.360	
Caratteristiche di sollecitazione				
Sezione 1: *Pannello in CLT*				
σ_1	-1.6	N/mm^2	-1.3	N/mm^2
$\sigma_{1,m}$	3.8	N/mm^2	2.8	N/mm^2
Sezione 2: *Trave metallica*				
σ_2	52.5	N/mm^2	42.2	N/mm^2
$\sigma_{2,c}$	-175.2	N/mm^2	-207.0	N/mm^2
$\sigma_{2,t}$	138.7	N/mm^2	163.9	N/mm^2
Sistema di collegamento				
F_d	21.9	KN	17.6	KN

Verifiche di resistenza			
Sezione 1:	**EC5**	0.30	0.22
Pannello in CLT	**NTC**	0.26	0.19
Sezione 2:	**EC3**	0.62	0.73
Trave metallica	**NTC**	0.59	0.69
Sistema di	**EC5**	0.83	0.69
collegamento	**NTC**	0.96	0.77

Si osserva che con il trascorrere del tempo, l'elemento in CLT costituente la soletta del sistema composto, tende a diminuire il proprio stato tensionale, inducendo a sua volta una diminuzione delle sollecitazioni nel sistema di collegamento. Questo è dovuto all'intrinseco comportamento visco-elastico del legno, il quale provoca una sorta di redistribuzione delle azioni, dalla soletta alla trave metallica. L'elemento in acciaio, infatti, con il tempo incrementa il proprio stato tensionale, in termini sia di azione assiale, sia di momento flettente.

Al fine di effettuare le verifiche in esercizio, le principali normative vigenti, a livello nazionale ed europeo, fanno riferimento alla medesima procedura di calcolo. Il materiale legno presenta un comportamento viscoso con il passare del tempo, pertanto, in maniera del tutto analoga al caso precedente, non è possibile limitarsi alla valutazione della sola

freccia istantanea, ma deve essere adeguatamente controllata anche quella differita, soprattutto nel caso in cui le azioni di tipo permanente risultino percentualmente elevate rispetto al carico totale. La deformazione finale deve dunque essere valutata tenendo conto della deformazione istantanea e differita, effettuando una semplice combinazione lineare. Facendo riferimento alla *Combinazione di carico Rara*, valutata in accordo alla vigente normativa nazionale, si ottiene il seguente valore di freccia di inflessione:

$$w_{fin} = w_{ist} + w_{dif} = 15.8 + 6.8 = 22.6\,mm < 28.7\,mm = \frac{5750}{200} = \frac{l}{200}$$

Si può osservare che anche questa condizione risulta verificata. Il soddisfacimento di tale verifica era praticamente scontato, dal momento che questi sistemi sono stati progettati in modo da rispettare con un buon margine di errore le limitazioni di freccia in esercizio.

Invece, risulta necessario precisare che la verifica del passo minimo tra i connettori non risulta verificata. Il sistema in esame infatti, nella zona centrale, prevede una spaziatura tra gli elementi di collegamento di circa $s = 600\,mm$. Per i sistemi composti però, la normativa nazionale raccomanda che la massima spaziatura longitudinale dei connettori a taglio non risulti maggiore a 6 volte lo spessore totale della soletta del sistema composto. In questo caso, il passo massimo consentito risulterebbe pari a:

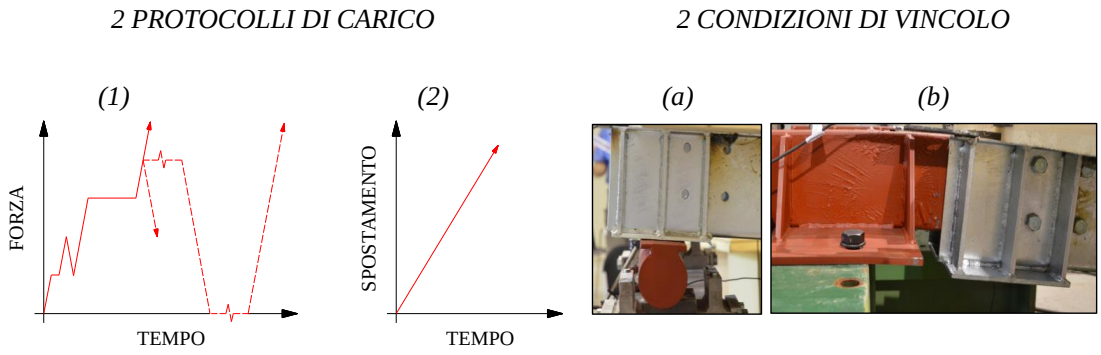
$$s_{max} = 6 \cdot h_{CLT} = 6 \cdot 85 = 510\,mm$$

Tuttavia, la direttiva fa riferimento ai sistemi composti acciaio-calcestruzzo, e attraverso i test sperimentali descritti nel seguito sarà possibile constatare che il non soddisfacimento di tale condizione non risulta essere un problema per il comportamento globale del sistema.

3 Risultati delle prove sperimentali

Con la campagna sperimentale in esame, sono state analizzate tre differenti tipologie di campioni, le cui sostanziali differenze riguardano il tipo di collegamento utilizzato per ottenere un'efficiente collaborazione tra le travi metalliche e il pannello ligneo.

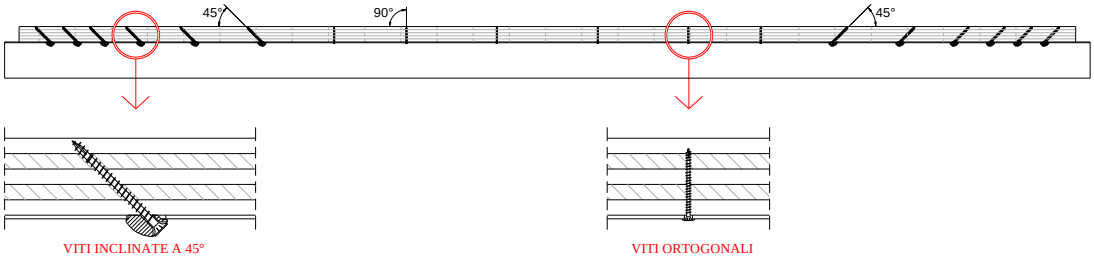
Per ogni tipologia di campione analizzato, sono state realizzate tre distinte metodologie di prova, combinando due differenti protocolli di carico (prove in controllo di spostamento e in controllo di forza) e due diverse configurazioni di vincolo (campione in semplice appoggio e campione incastrato alle estremità).



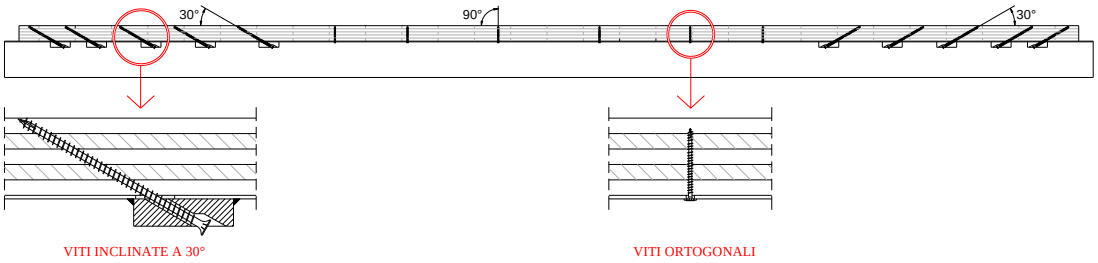
(1) Prova in controllo di forza *(2)* Prova in controllo di spostamento *(a)* Appoggio-Appoggio *(b)* Incastro-Incastro

Le diverse tipologie di sistema composto sperimentate vengono brevemente descritte di seguito, indicando le principali differenze in termini di sistema di collegamento adottato.

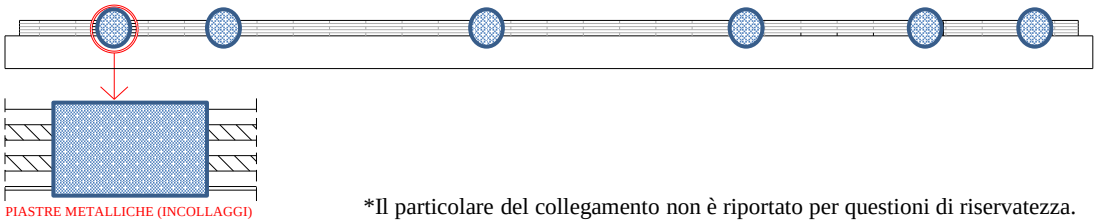
Tipologia A . Connessione meccanica che prevede l'uso di viti inclinate a ±45° alle estremità e viti disposte ortogonalmente nella zona centrale.



Tipologia B . Connessione meccanica che prevede l'uso di viti inclinate a ±30° alle estremità e viti disposte ortogonalmente nella zona centrale.



Tipologia C . Connessione che prevede l'uso di piastre metalliche forate, incollate in corrispondenza di opportuni intagli realizzati nel pannello in CLT, disposte sull'intera lunghezza del sistema con passo variabile.

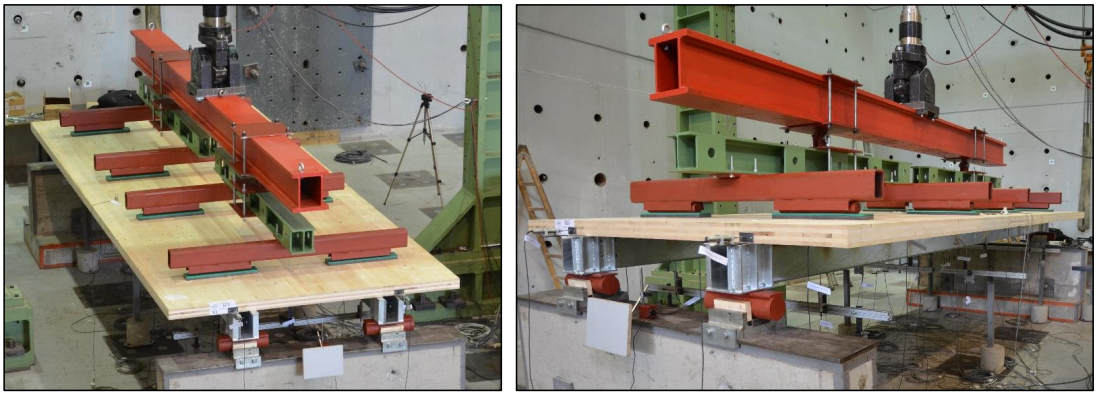


*Il particolare del collegamento non è riportato per questioni di riservatezza.

In queste memorie verranno mostrati i risultati di una sola prova sperimentale, effettuata su un campione di solaio di *Tipologia A*, che prevede un sistema di collegamento realizzato attraverso l'uso di viti inclinate a ±45° e una configurazione di vincolo in semplice appoggio.

3.1 Descrizione del setup di prova

Tutte le prove di laboratorio sono state effettuate utilizzando un attuatore idraulico, al quale è stato agganciato il setup di prova, costituito da una trave principale disposta longitudinalmente rispetto al campione utilizzato. Ad essa vengono agganciate due travi secondarie in acciaio, alle quali sono stati saldati degli ulteriori profili metallici in direzione ortogonale con lo scopo di realizzare dei punti di appoggio. In questo modo è possibile effettuare delle prove di flessione su sei punti, riproducendo con buona approssimazione l'effetto dell'applicazione di un carico distribuito. Di seguito vengono riportate delle rappresentazioni del setup di prova, il quale si mantiene invariato per tutte le prove effettuate. Nelle zone di applicazione del carico sono stati utilizzati dei particolari rulli in acciaio, con lo scopo di impedire lo spostamento del punto di carico rispetto alla sua posizione originaria.

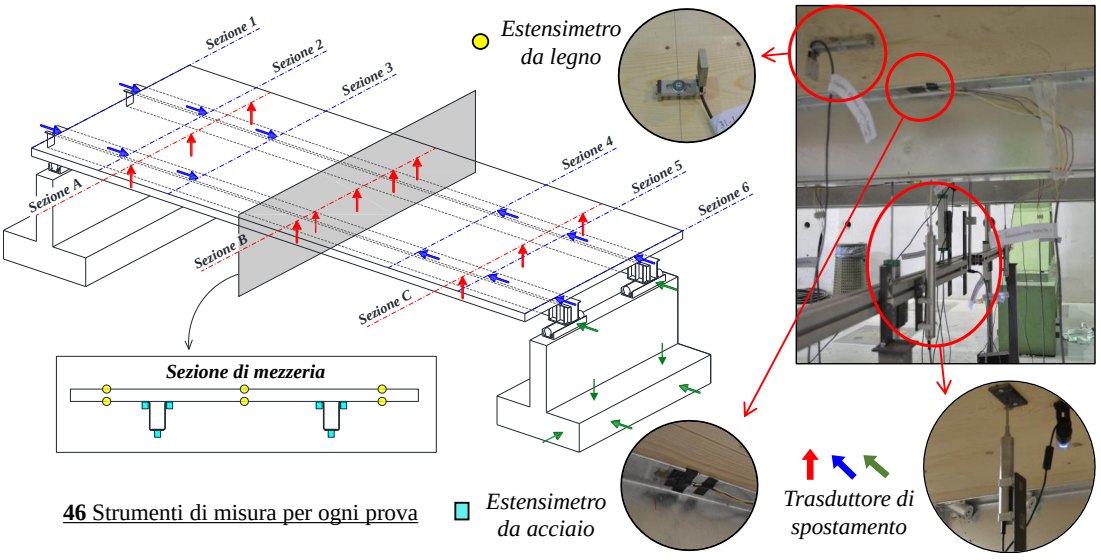


Setup di carico utilizzato per l'esecuzione delle prove di flessione

Al fine delle ottenere le leggi di comportamento *Forza-Spostamento*, gli stati di deformazione degli elementi, i legami costitutivi *stress-strain* e l'andamento generale del sistema composto, è stato necessario installare un'opportuna strumentazione di misura in diversi punti dei campioni. Tutti gli strumenti utilizzati sono stati collegati a delle centraline di acquisizione dei dati. Essi sono stati suddivisi in diversi gruppi, ciascuno riferito ad una specifica gerarchia di misura, sia essa eseguita a livello di sistema, di collegamento o di materiale. Nell'ordine:

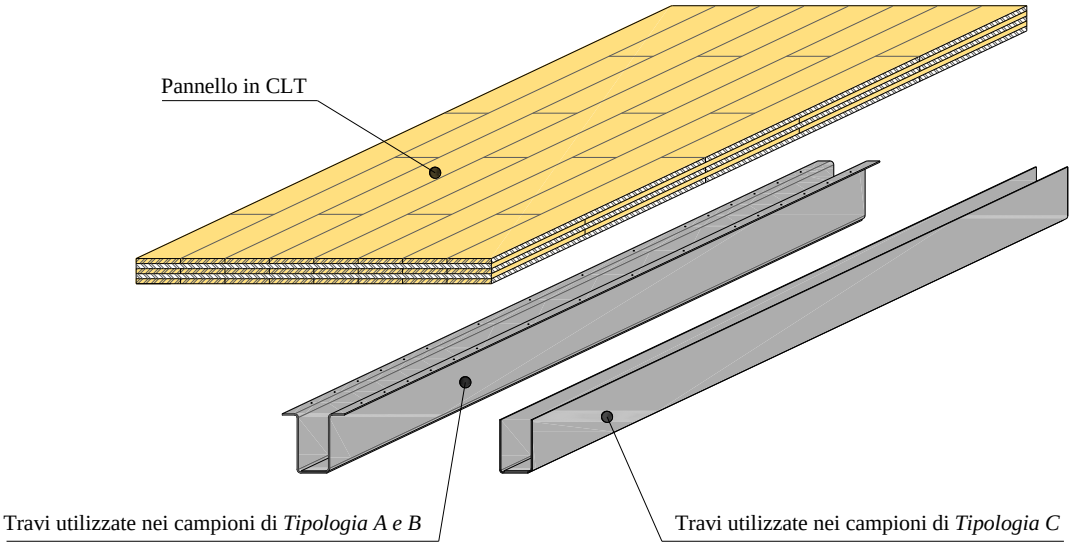
- **Livello globale**. Per studiare il comportamento complessivo del sistema, sono stati utilizzati dei trasduttori di spostamento in grado di misurare la deformata flessionale.
- **Livello di collegamento**. Sono stati predisposti degli opportuni strumenti di misura per valutare l'entità degli scorrimenti relativi che si verificano all'interfaccia tra le travi metalliche e il pannello in CLT.
- **Livello del materiale**. Con lo scopo di ricavare lo stato tensionale e le sollecitazioni agenti nella sezione di mezzeria, sono stati predisposti degli strumenti estensimetri su entrambi gli elementi.

Di seguito si riporta un'immagine rappresentativa del quantitativo di strumentazione utilizzato durante ogni singola prova sperimentale, dove in aggiunta allo schema di posizionamento, vengono riportate le immagini dei principali strumenti utilizzati.



3.2 Descrizione dei campioni e fasi di montaggio

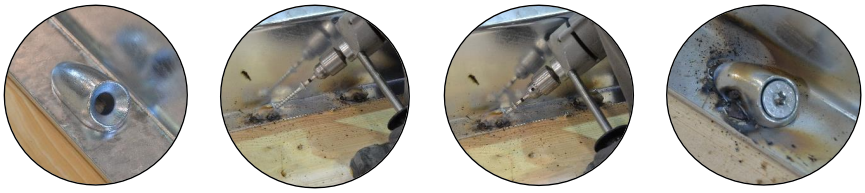
Le diverse tipologie di sistema composto acciaio-legno vengono realizzate accoppiando due travi in acciaio a profilo aperto con un pannello in CLT. Al fine di rendere perfettamente collaboranti i diversi elementi sono state previste due principali tecnologie di collegamento: una di tipo prettamente meccanico, che prevede l'installazione di viti inclinate, e l'altra di tipo chimico, che utilizza una speciale resina epossidica per incollare delle piastre metalliche in appositi alloggi realizzati nel pannello in CLT. Le due travi in acciaio vengono montate in corrispondenza dell'intradosso del pannello ligneo, e per meglio comprendere la composizione del sistema, nella seguente immagine viene riportata una rappresentazione grafica.



In figura è possibile notare la differente sezione trasversale delle travi metalliche utilizzate per la realizzazione dei campioni di *Tipologia A e B*, rispetto a quella delle travi che compongono i campioni di *Tipologia C*.

Le diverse tipologie di sistema considerate, essendo realizzate con tecnologie di collegamento diverse, necessitano di differenti procedure di montaggio. In tutti i casi, comunque, l'assemblaggio dei diversi campioni risulta essere semplice e veloce: le principali sequenze di montaggio, relative alle due differenti tecnologie di collegamento, vengono mostrate in maniera sintetica nell'immagine seguente.

Sequenza di montaggio dei collegamenti che prevedono l'uso di viti inclinate



1. Rosetta 2. Posizionamento vite 3. Inserimento vite 4. Risultato finale

Sequenza di montaggio dei collegamenti che prevedono l'uso di piastre metalliche forate

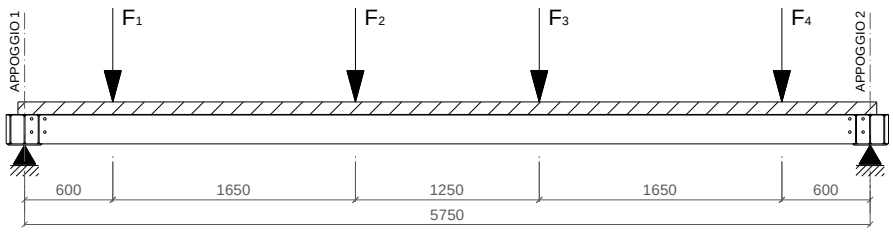
1. Fresatura 2. Foro nel legno 3. Inserimento resina 4. Risultato finale

3.3 Elaborazione dei dati ottenuti dalla prova sperimentale

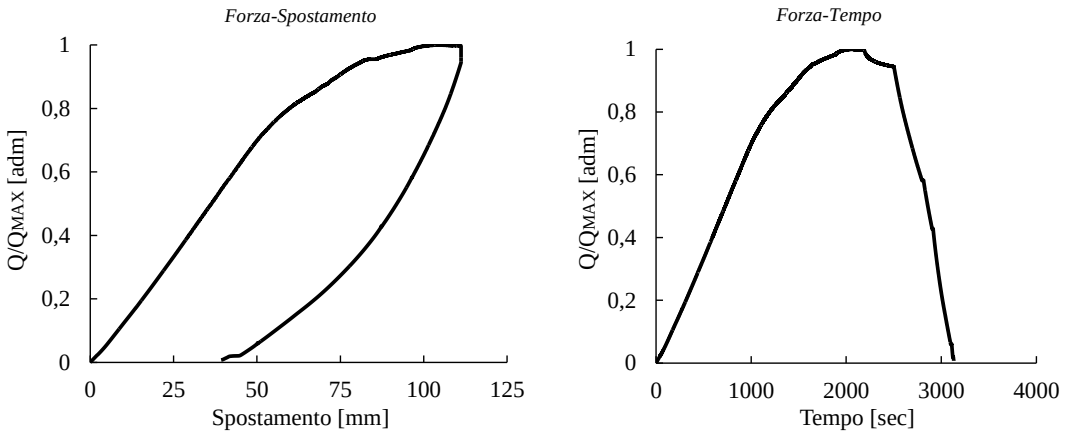
Per ogni tipologia di prova, utilizzando i dati ottenuti dai diversi strumenti installati sul generico sistema composto, è stato possibile mettere in relazione le diverse grandezze fisiche misurate. Di seguito si riporta un elenco delle principali analisi eseguite a posteriori, effettuate in corrispondenza di specifiche frazioni di carico massimo.

- Valutazione della rigidezza del sistema composto attraverso la costruzione del diagramma *Forza-Spostamento*;
- Ricostruzione della configurazione deformata flessionale del campione;
- Controllo degli scorrimenti relativi tra i due elementi costituenti il sistema composto, ovvero tra le travi in acciaio e la soletta in CLT;
- Valutazione dello stato tenso-deformativo dell'intero sistema nella sezione di mezzeria;

In queste memorie si mostreranno esclusivamente i principali risultati ottenuti da una prova di flessione effettuata su un campione di solaio di *Tipologia A*. Tutti i valori numerici sono riportati in forma adimensionale, in modo da garantire la riservatezza dei dati. Nella seguente immagine si riporta lo schema di applicazione dei carichi utilizzato per la prova di flessione eseguita in controllo di spostamento, considerando la condizione di vincolo in semplice appoggio.

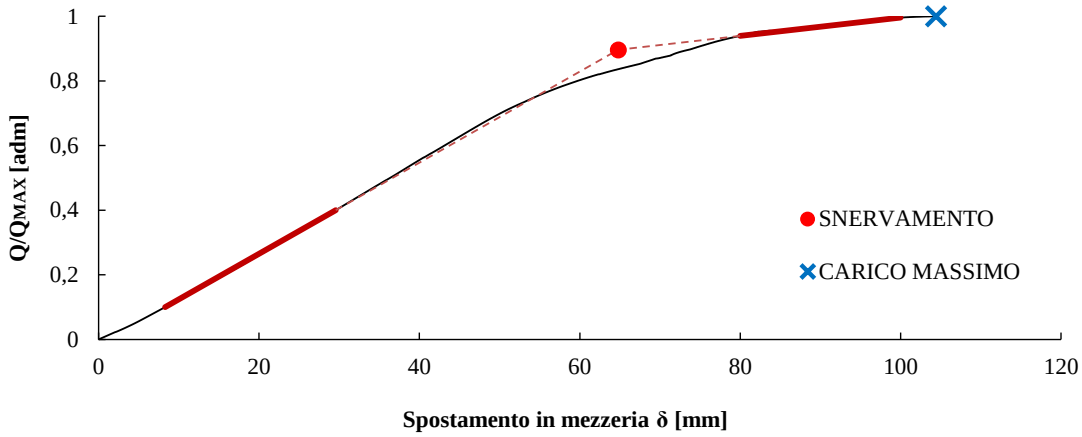


La curva *Forza-Spostamento* associata ai dati ricavati dal martinetto idraulico viene proposta di seguito, unitamente al grafico relativo all'applicazione della forza in funzione del tempo.



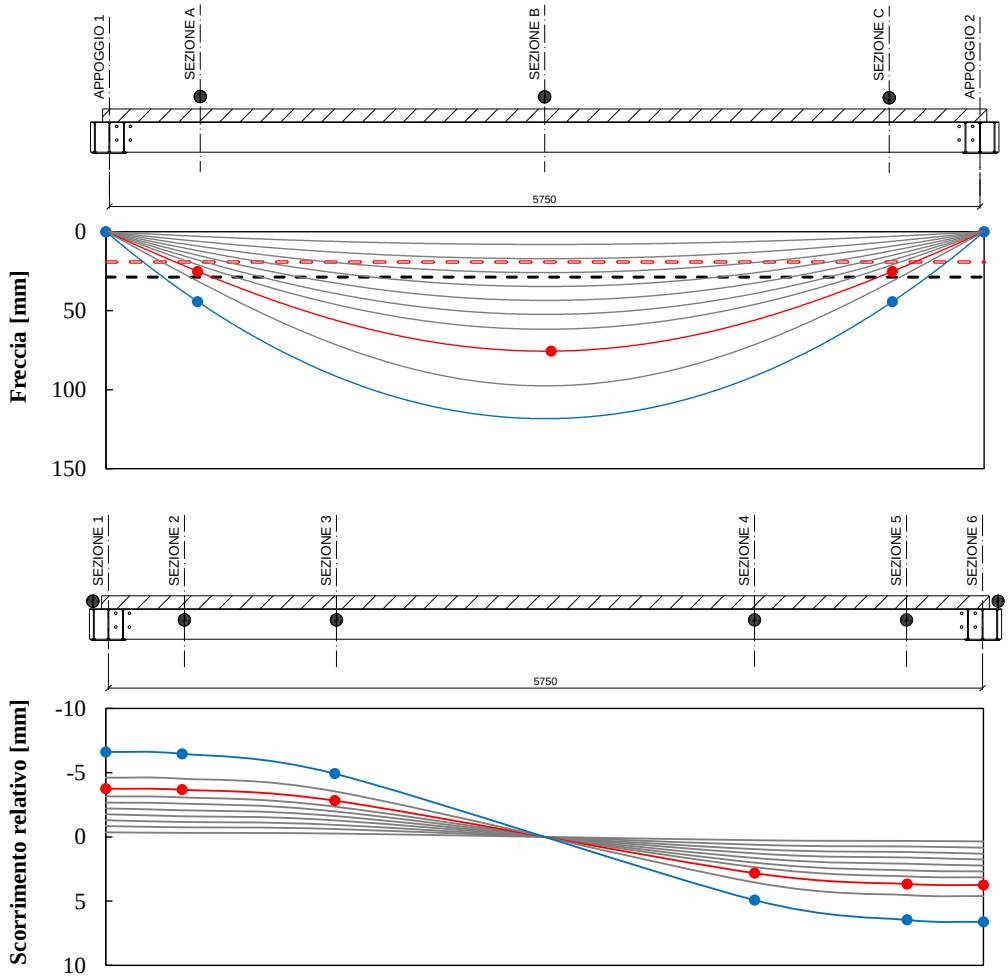
Curva di comportamento

Mettendo in relazione lo spostamento misurato in mezzeria con la forza applicata dal martinetto è stato possibile riprodurre la curva di comportamento del sistema composto. Inoltre, utilizzando la procedura di calcolo fornita dalla normativa *prEN 12512*, sono stati valutati i punti di snervamento e di carico massimo.



Deformata flessionale e scorrimenti relativi

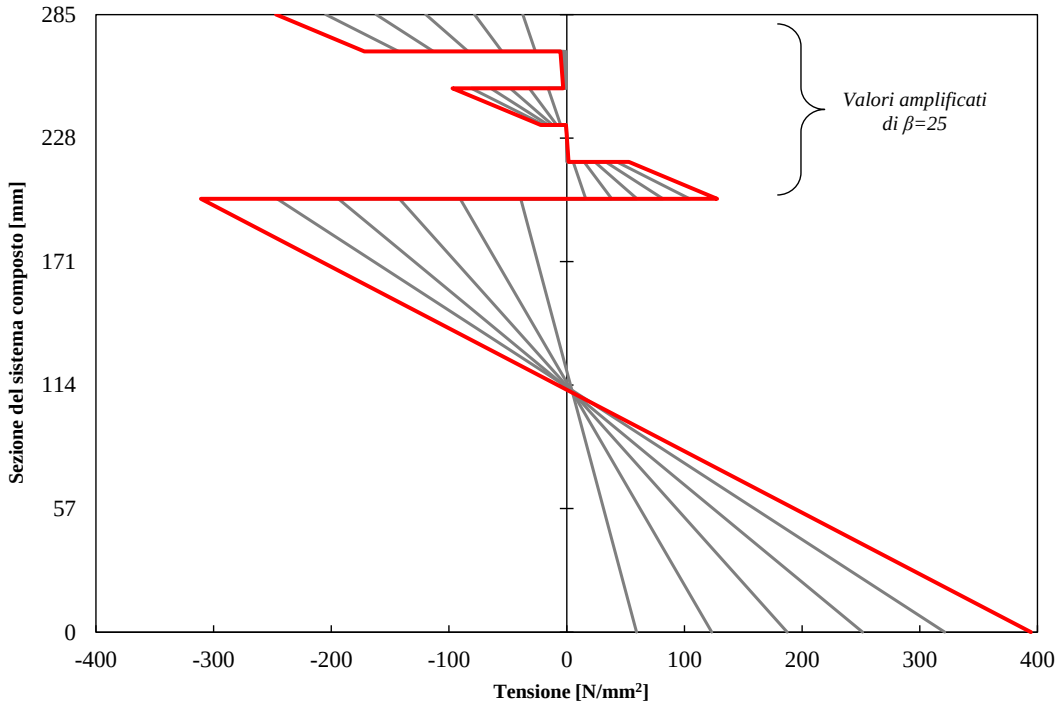
Nella figura seguente si riportano la deformata flessionale e gli scorrimenti relativi trave-pannello, misurati in corrispondenza di specifiche frazioni di carico massimo (le linee tratteggiate indicano i limiti di freccia delle verifiche di esercizio).



Con le linee rosse vengono indicate le deformazioni corrispondenti al punto di snervamento, mentre con quelle blu le deformazioni in corrispondenza del punto di carico massimo. Si nota come dopo il raggiungimento del punto di snervamento, il campione subisca notevoli incrementi di deformazione associati a piccoli incrementi di carico.

Stato tensionale del sistema composto

Utilizzando i dati ricavati dagli strumenti estensimetrici posti in corrispondenza dei lembi superiore e inferiore di ogni elemento, è stato possibile ricavare l'andamento delle tensioni dell'intero sistema composto legno-acciaio. Si riporta il comportamento medio della sola sezione in mezzeria, mostrandone l'andamento grafico. Lo stato tensionale nel legno è stato amplificato di un fattore $\beta = 25$.



Sono disponibili solamente i dati riferiti alla fase elastica del campione, in quanto al raggiungimento del punto di snervamento gli strumenti estensimetrici vengono danneggiati.

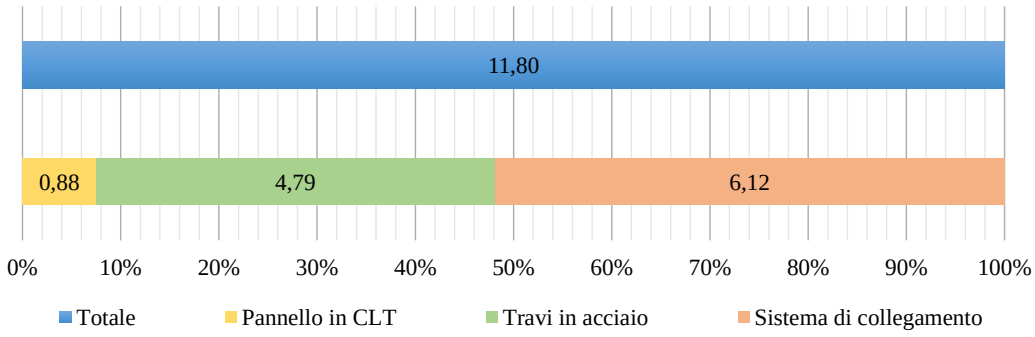
Rigidezza del campione

La rigidezza del sistema, valutata tra il 10% ed il 40% del carico massimo, in accordo con la normativa $prEN12512$, assume il seguente valore:

$$K = \frac{Q_{40\%} - Q_{10\%}}{\delta_{40\%} - \delta_{10\%}} \cdot \frac{1}{Q_{max}} = 11.80\, mm^{-1}$$

Nel seguente grafico si è cercato di evidenziare il contributo in termini di rigidezza offerto dal sistema di collegamento utilizzato.

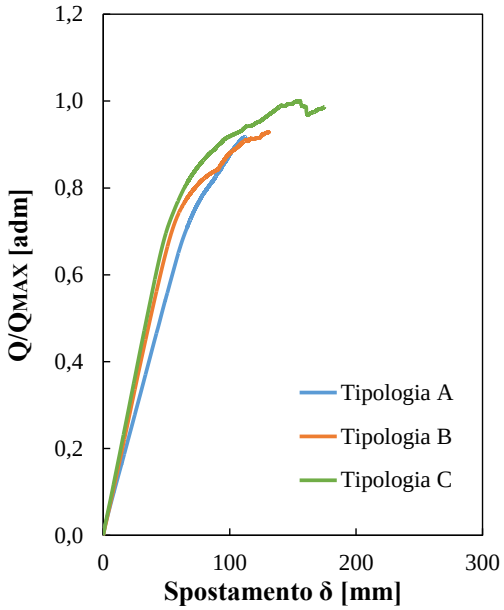
Contributo in termini di rigidezza fornito dai diversi componenti del sistema [mm^{-1}]

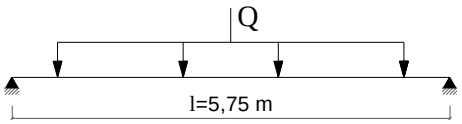


3.4 Confronto dei risultati sperimentali

Di seguito viene proposto un confronto tra i diversi sistemi analizzati, in termini di curva di comportamento e di rigidezza in condizioni di esercizio.

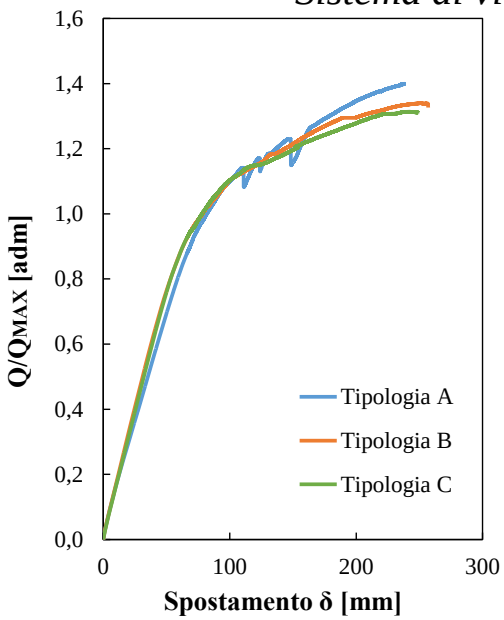
Sistema di vincolo in semplice appoggio

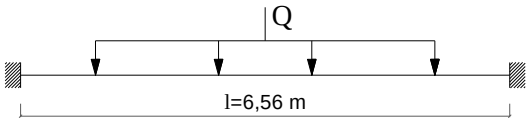




	Carico QMAX [adm]	Rigidezza K [mm^{-1}]
Tipologia A	0.92	11.80
Tipologia B	0.93	14.65
Tipologia C	1.00	14.61

Sistema di vincolo ad incastro

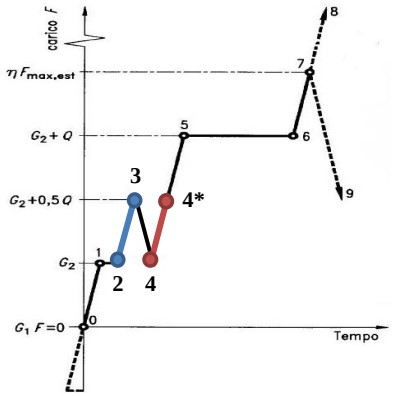




	Carico QMAX [adm]	Rigidezza K [mm^{-1}]
Tipologia A	1.40	14.95
Tipologia B	1.34	17.05
Tipologia C	1.31	15.31

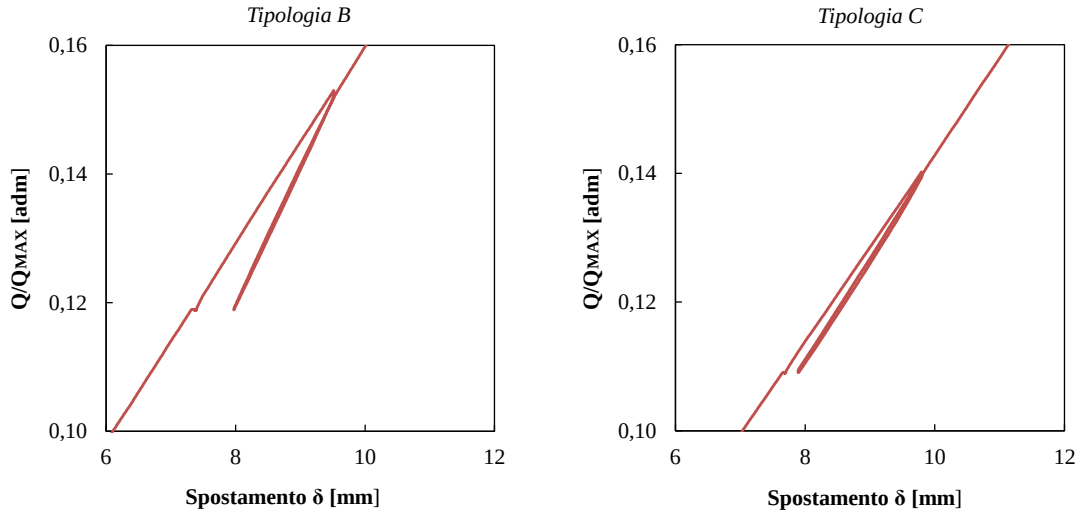
A prima vista sarebbe difficile indicare la tipologia di collegamento in grado di garantire un'efficienza migliore. Solamente dopo un'attenta analisi, prendendo in considerazione svariati aspetti, quali geometria del sistema ed economicità (associata sia al quantitativo di materiale utilizzato, sia alla velocità di montaggio), è possibile affermare che la soluzione di *Tipologia C* risulta la migliore. Infatti, le travi metalliche che costituiscono i campioni di *Tipologia A* e *B* presentano un'altezza pari ad $h = 200\,mm$, mentre quelle utilizzate per i campioni di *Tipologia C* sono più basse, avendo un'altezza pari a $h = 180\,mm$. Questo fattore, infatti, non è per niente trascurabile, dal momento che incide molto sullo spessore dell'intero solaio e pertanto si riperquote in maniera notevole sulla volumetria dell'intero edificio.

Dalle curve di comportamento ricavate nelle procedure di carico in controllo di forza, invece, è stato possibile osservare come tutte le tipologie prese in esame, nel caso in cui vengano sollecitate con carichi ciclici di modesta entità, mantengono un comportamento elastico lineare quasi perfetto. Ad eccezione del sistema di *Tipologia A*, per il quale non è stato possibile eseguire la prova in controllo di forza, di seguito si mostra il confronto tra la rigidezza valutata durante la prima fase di carico in condizioni elastiche (indicata nell'immagine seguente con il tratto compreso tra il punto 2 e il punto 3) e la rigidezza osservata nel tratto di ricarico (successivo ad una fase intermedia di scarico), indicato con la linea rossa compresa tra il punto 4 e un punto 4*, corrispondente alla medesima forza raggiunta nel punto 3 indicato precedentemente.



	Intervallo di Forza	**Rigidezza K** $[mm^{-1}]$
B-T1	$2 \div 3$	13.86
	$4 \div 4^*$	18.37
C-T1	$2 \div 3$	13.65
	$4 \div 4^*$	15.22

In entrambi i campioni, durante la fase di scarico e ricarico, si riscontra un'incremento di rigidezza. Questo aspetto, visti i bassi livelli di carico raggiunti, non è da attribuire ad un degrado del sistema, poiché quest'ultimo rimane perfettamente in campo elastico (come si può osservare chiaramente dalle curve di ricarico nella figura seguente, le quali ripercorrono esattamente l'andamento di quelle di scarico). La causa dell'aumento di rigidezza in fase di scarico, può essere una parziale redistribuzione delle sollecitazioni tra i due elementi del sistema, causata proprio dalla presenza dei sistemi di collegamento.

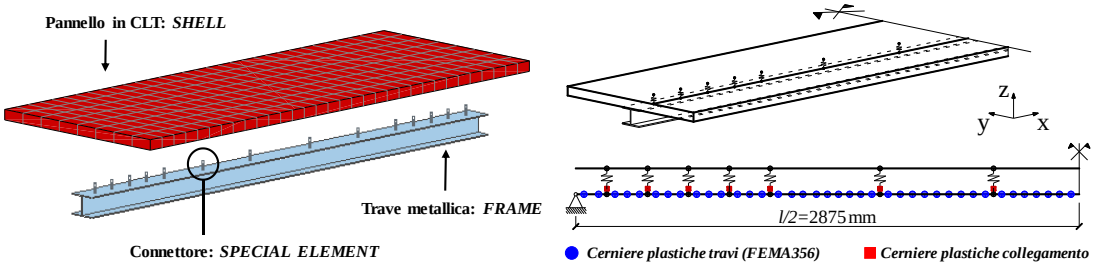


Infatti, dai precedenti grafici è possibile notare come questo effetto sia più marcato per il campione di *Tipologia B*, nel quale i connettori a vite possono risentire di una modalità di applicazione meno uniforme rispetto a quelli realizzati con piastre metalliche incollate (alcune viti possono essere state installate con maggior o minor forza rispetto ad altre). Al successivo raggiungimento del livello di carico massimo, indicato nella precedente figura con il simbolo 4*, si osserva che la pendenza della curva torna ad essere quella iniziale, riferita cioè al comportamento del campione indisturbato.

4 Modellazione numerica

L'indagine numerica è stata condotta prendendo in esame dei pannelli modulari aventi le medesime dimensioni di quelli utilizzati nelle prove sperimentali. Sono state effettuate delle analisi statiche non lineari, valutando l'effettivo comportamento di collegamenti, travi metalliche e pannelli in CLT. Al fine di ottenere dei risultati soddisfacenti, è stato necessario effettuare un'attenta procedura di modellazione di tutti gli elementi utilizzati, replicando le effettive grandezze geometriche e le reali proprietà meccaniche dei materiali. Di seguito ne verranno elencate le principali caratteristiche:

- **Travi metalliche**. Sono state implementate come elementi monodimensionali di tipo *Frame*, definendo una sezione equivalente in modo tale che il momento d'inerzia fosse il medesimo della sezione reale.
- **Pannello in CLT**. È stato definito come elemento bidimensionale di tipo *Shell*, opportunamente discretizzato e realizzato da cinque strati di materiale differente, in grado di replicare il comportamento ortotropo del legno.
- **Connettore**. Per ogni elemento di collegamento è stato necessario definire uno speciale elemento *Frame*, definendo una determinata rigidezza flessionale e una specifica curva di comportamento. Queste due caratteristiche sono state valutate da precedenti campagne sperimentali.



Infine, ogni elemento implementato è stato predisposto con delle opportune cerniere pastiche (eccetto il pannello in CLT), in modo da replicare l'effettivo comportamento non lineare dei materiali durante le analisi di tipo *Pushover*.

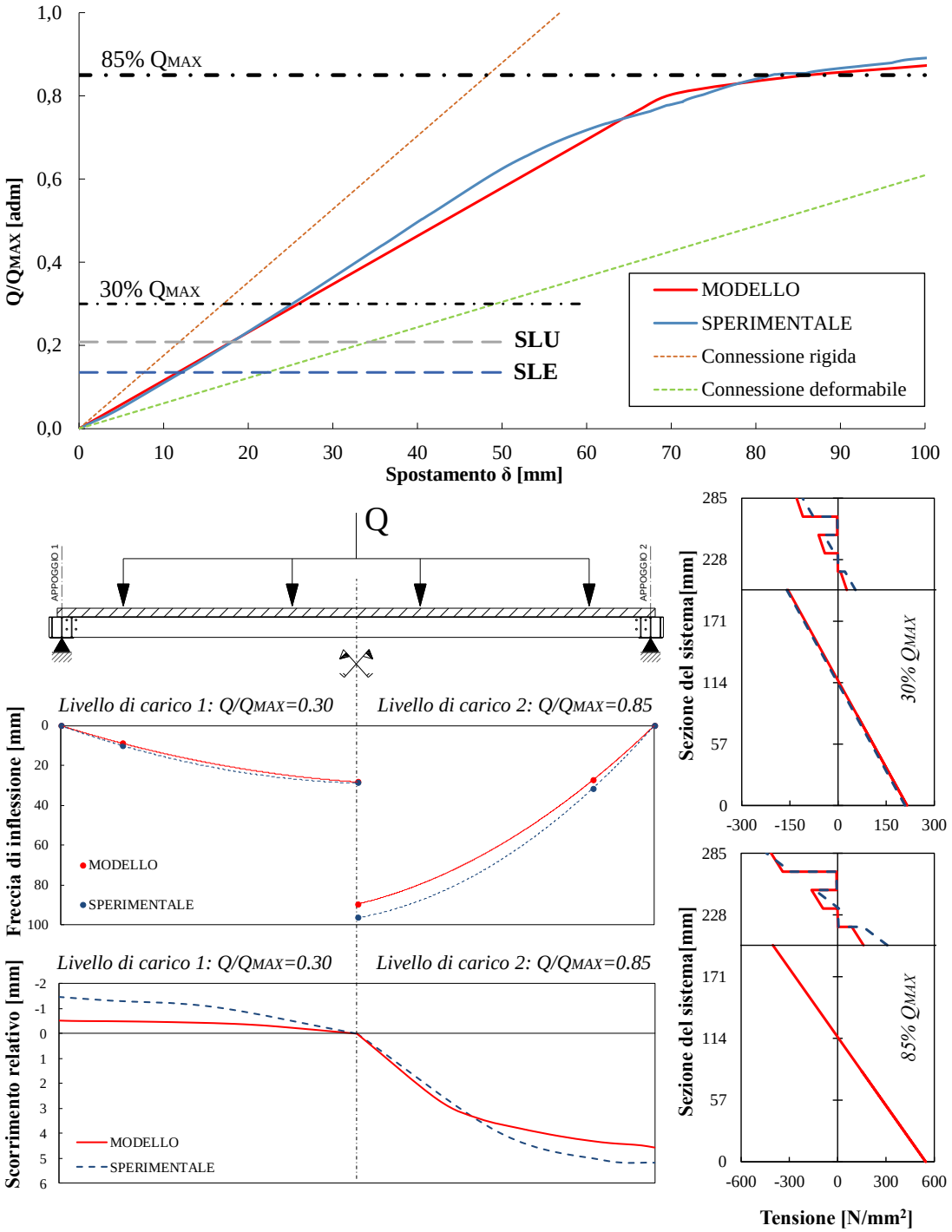
4.1 Confronto con i risultati sperimentali

Facendo sempre riferimento al campione di *Tipologia A*, è stato possibile mettere in relazione i risultati ottenuti dall'analisi numerica con le osservazioni effettuate durante la fase sperimentale. Nei grafici a pagina seguente vengono proposte delle curve di confronto, che mostrano i principali risultati numerici ottenuti, in corrispondenza di due livelli di carico considerati rappresentativi della fase di comportamento elastica e plastica (30% e 80% del carico massimo).

Attraverso la comparazione dei risultati ottenuti dalle analisi numeriche con i relativi dati ricavati tramite sperimentazione, è possibile affermare che il software ad elementi finiti riesce a restituire dei risultati piuttosto attendibili. Infatti, i diversi modelli implementati, anche se costituiti da elementi monodimensionali e bidimensionali, sono in grado di replicare in maniera abbastanza fedele la fase di risposta elastica dei diversi elementi composti, nella quale ricadono i casi di maggior interesse progettuale.

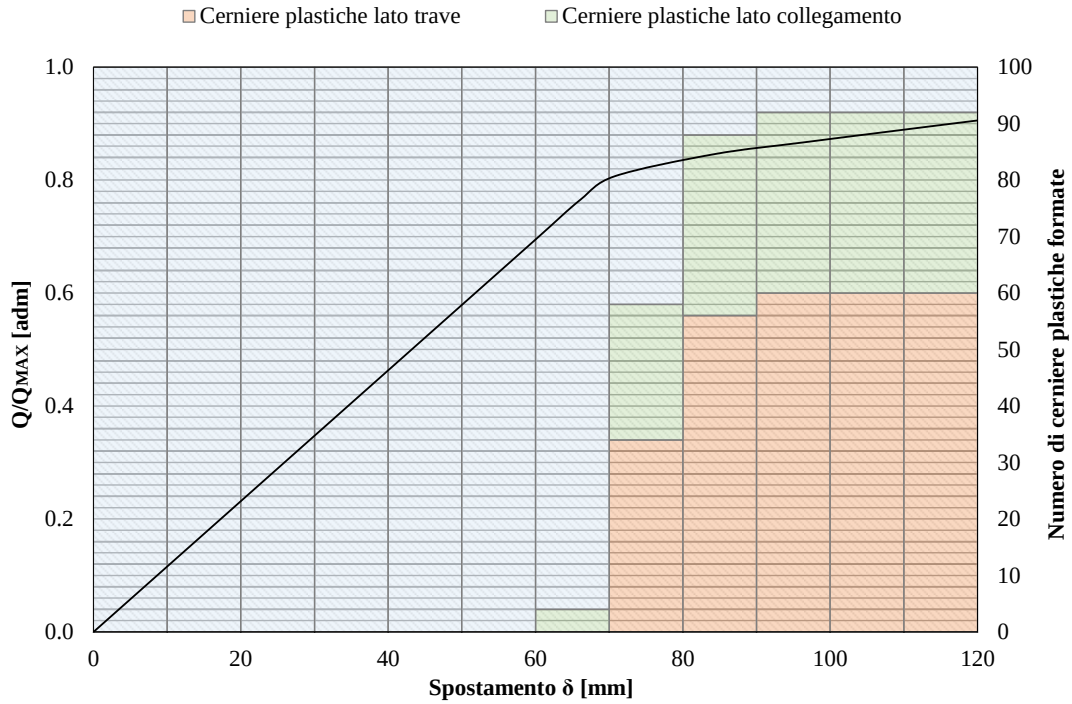
A livello globale e a livello di collegamento, è stato possibile riprodurre correttamente il comportamento reale, sia in termini di curva di comportamento, sia in termini di configurazione deformata. A livello di materiale, invece, i risultati sono discordanti. Se lato acciaio il modello replica in maniera molto fedele le evidenze sperimentali, la stessa

cosa non avviene lato legno. Nel pannello in CLT, infatti, gli errori riscontrati sono percentualmente più elevati, a causa dell'implementazione semplificata del materiale nel software di calcolo, al quale è stata attribuita una legge di comportamento lineare.

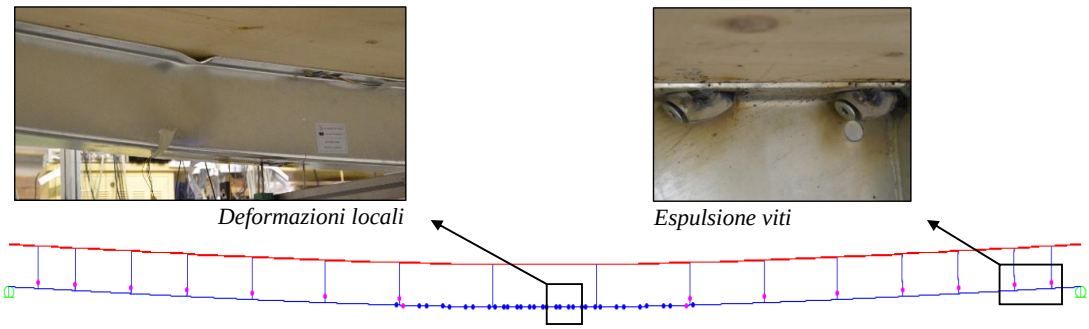


Oltre a replicare in maniera abbastanza fedele il comportamento del sistema, il modello numerico è anche in grado di determinare l'evoluzione delle deformazioni locali subite dai singoli elementi a causa del progressivo incremento di carico. Nell'immagine seguente si riporta l'andamento della curva di comportamento, associato ad un grafico che mostra il numero di cerniere plastiche che si creano durante il processo di analisi. Si osserva che, fino al raggiungimento del punto di snervamento, i materiali rimangono perfettamente in campo elastico, mentre in corrispondenza di un livello di carico pari a

$Q/Q_{MAX} \simeq 0.70$ iniziano a comparire le prime cerniere plastiche nella sezione centrale della trave e nei connettori posti alle estremità del sistema.



I reali meccanismi che provocano lo snervamento del sistema composto, ovvero la parziale estrazione delle viti in corrispondenza delle zone di estremità del sistema e le deformazioni locali dei profili in acciaio nella sezione di mezzeria, vengono mostrati nella figura seguente, associati al risultato grafico fornito dalle analisi numeriche.



5 Conclusioni

In questo documento è stata mostrata una particolare tecnologia costruttiva, innovativa e sostenibile, che si avvale della combinazione di elementi in legno e acciaio, al fine di ottenere un sistema composto prefabbricato. Ogni elemento modulare è formato dall'unione di due travi metalliche con un pannello in CLT, attraverso delle soluzioni di collegamento in grado di velocizzare la fase di montaggio, riducendo i costi connessi alla costruzione dell'edificio. A fare la differenza, rispetto alle tradizionali strutture composte, è proprio la combinazione di due materiali dalle caratteristiche molto differenti: il legno e l'acciaio. L'attento uso di questi materiali permette di conferire al sistema alte prestazioni e una notevole leggerezza strutturale. Infatti, il peso del generico elemento di solaio è circa $0.62\,KN$ per metro quadrato, ed in termini di volume, più del 95%

del totale è costituito da legno, un materiale facilmente riciclabile e riutilizzabile. In questo modo è stato ridotto il più possibile l'utilizzo di prodotti non riciclabili, come la resina epossidica usata nei sistemi di collegamento, assicurando all'intera struttura elevati standard di sostenibilità ambientale.

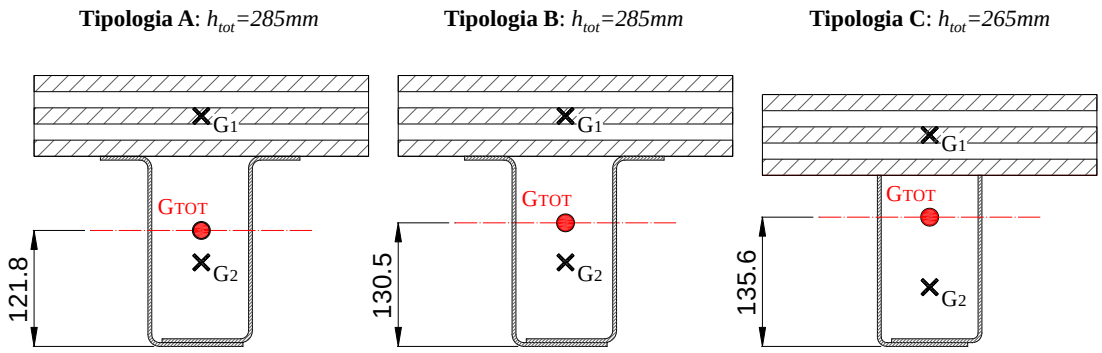
In una preliminare fase progettuale, basandosi sulla teoria classica delle travi composte, si è stimato che il solaio in esame fosse in grado di manifestare una rigidezza e una resistenza ultima perfettamente comparabili con quelle mostrate dalle soluzioni che prevedono l'utilizzo del calcestruzzo armato. Una notevole differenza, invece, è stata riscontrata confrontando la capacità portante specifica dei diversi sistemi. Infatti, la soluzione acciaio-legno, grazie all'elevata leggerezza, assicura un'efficenza di gran lunga superiore. Tali previsioni sono state completamente validate dai risultati sperimentali, osservando come la teoria classica sia in grado di predire in maniera molto affidabile l'effettivo comportamento flessionale della struttura, in relazione alle principali condizioni di carico previste dalle vigenti normative (*Stato Limite Ultimo* e *di Esercizio*).

Sulla base dei risultati ottenuti nelle diverse prove sperimentali, è stato dunque possibile trarre delle importanti conclusioni sull'effettivo comportamento di tale sistema composto. Sono state prese in esame tre differenti soluzioni che prevedono l'utilizzo singolo o combinato di due diverse tecnologie di collegamento: una di tipo puramente meccanico e una a base di resina epossidica. Inoltre, per ogni tipologia di campione, sono state realizzate tre differenti procedure di prova, in modo da valutare sia il reale comportamento flessionale in funzione di due diverse tipologie di vincolo, sia il comportamento in esercizio, sulla base di una determinata procedura di carico ciclica. Attraverso l'analisi dei risultati ottenuti nelle diverse prove si è potuto dimostrare l'ottimo funzionamento di questo sistema costruttivo, il quale, nella totalità dei casi considerati, mostra un comportamento duttile e sovraresitente, in grado di mantenere quasi inalterata la propria integrità anche se sottoposto a carichi molto elevati, come si può notare dalla seguente immagine.

Deformata flessionale del sistema composto sotto l'azione dei carichi imposti dal martinetto idraulico

Per quanto riguarda i differenti sistemi di collegamento utilizzati, non sono state riscontrate sostanziali differenze dal punto di vista del contributo di rigidezza offerto in condizioni di esercizio, il quale si avvicina molto a quello del caso ideale di connessione infinitamente rigida. Solamente in seguito ad un'attenta elaborazione dei dati ottenuti, il sistema di collegamento che prevede l'utilizzo di piastre metalliche incollate al pannello in CLT per mezzo di una speciale resina epossidica, è risultato essere in grado di mostrare una rigidezza in esercizio leggermente superiore rispetto alle altre tipologie. Tale comportamento è senza dubbio garantito dal particolare vantaggio conferito dall'unione incollata, potendo contare su un'elevata rigidezza senza alcun assestamento iniziale. Questa soluzione di collegamento risulta dunque la più efficiente, poiché

prevede un numero inferiore di connettori e un'altezza del pacchetto di solaio minore. Questo aspetto si evince chiaramente valutando la posizione del baricentro della sezione composta, in relazione alle differenti tipologie di sistema composto considerate.



Dall'immagine precedente si può notare chiaramente che il campione di *Tipologia C* presenta un asse baricentro leggermente più elevato rispetto alle altre tipologie di sistema composto. Questo sta ad indicare una maggior efficienza del sistema, poiché più l'asse baricentrico si avvicina all'interfaccia tra gli elementi, più i due materiali vengono utilizzati in maniera ottimale.

In generale però, le diverse tipologie di collegamento sperimentate non mostrano notevoli differenze in termini prestazionali. Il grande vantaggio di tale sistema costruttivo è dunque quello di poter far affidamento essenzialmente su due soluzioni di collegamento completamente differenti ma allo stesso modo efficienti, le quali, seppur tecnologicamente all'avanguardia, possono essere realizzate in maniera semplice e veloce, anche da personale non specializzato.

Dalle osservazioni effettuate sia durante lo svolgimento delle prove, sia nella successiva elaborazione dei dati acquisiti, è stato possibile riscontrare che gli elementi che governano il comportamento globale della struttura composta sono senza dubbio le travi metalliche. Esse infatti, al raggiungimento di determinati livelli di carico, a causa della naturale formazione di cerniere plastiche in corrispondenza della sezione di mezzeria (inizialmente al lembo compresso e solamente in un secondo momento al lembo teso), provocano una progressiva perdita di rigidezza dell'intero sistema. A questo proposito, risulta essere di fondamentale importanza, la presenza del pannello in CLT, il quale, essendo posizionato in corrispondenza del lembo compresso delle travi metalliche, impedisce il loro imbozzamento, limitando possibili effetti negativi provocati dall'instabilità. In aggiunta, oltre ad avere un effetto stabilizzante per l'intero sistema composto, il pannello ligneo contribuisce a distribuire in maniera uniforme gli eventuali carichi puntuali agenti direttamente su di esso. Escludendo alcuni casi particolari, nei quali a seguito del raggiungimento di carichi elevati si sono riscontrate delle rotture localizzate di tipo fragile, i pannelli in CLT non hanno manifestato alcun tipo di danneggiamento, mantenendo praticamente inalterate le proprie caratteristiche fisiche e meccaniche. Tale comportamento deriva dal fatto che la progettazione dei diversi elementi modulari è strettamente basata sul soddisfacimento delle verifiche in termini di esercizio. Questo implica che il comportamento dell'intero sistema, fino al raggiungimento di una determinata configurazione deformata, debba mantenersi in campo elastico, garantendo in tal modo una totale reversibilità. Questo aspetto è sicuramente un vantaggio dal punto di vista di un'eventuale verifica strutturale, dal momento che l'effettivo comportamento del sistema può essere studiato con un'ottima approssimazione facendo ricorso alle principali teorie elastiche, senza il rischio di commettere errori grossolani.

La parte conclusiva dell'elaborato, incentrata sull'analisi numerica di un modello FEM, tratta la simulazione del comportamento flessionale osservato in fase sperimentale. I diversi componenti del solaio composto sono stati implementati nel software attraverso l'uso di elementi *Frame* (per travi e collegamenti) ed elementi *Shell* (per il pannello in CLT), attribuendo le reali dimensioni geometriche e le relative proprietà meccaniche. Il comportamento non lineare di collegamenti e travi metalliche, è stato riprodotto attraverso la definizione di opportune cerniere plastiche, sulla base di precedenti dati sperimentali o comprovati documenti da letteratura. Da tali modelli numerici, attraverso analisi di tipo statico non lineare, sono stati ottenuti dei risultati del tutto analoghi a quelli ricavati nelle diverse prove sperimentali, in termini sia comportamentali sia tensionali. La realizzazione di un modello previsionale affidabile, permette infatti uno sviluppo più agevole di tali sistemi, effettuando modifiche e migliorie, senza dover ricorrere ad ulteriori test di laboratorio per caratterizzarne il comportamento.

In conclusione, questo nuovo sistema costruttivo acciaio-legno si è dimostrato all'altezza delle aspettative, in termini sia tecnologici sia strutturali. I principali punti di forza sono sicuramente l'elevato rapporto *capacità-peso proprio* e la grande sostenibilità del sistema, i quali consentono rispettivamente una notevole riduzione dei carichi permanenti ed elevati standard qualitativi per l'intero edificio. Questa soluzione è ancora in via di sviluppo e nel prossimo futuro verrà ulteriormente affinata, studiandone il comportamento in relazione all'intera struttura. Attraverso un'ulteriore fase di sperimentazione, verranno effettuati dei test su un modulo di edificio in scala reale, applicando dei carichi orizzontali alla struttura, in modo da valutare la reale risposta dei solai composti. In parallelo a queste prove sperimentali, si svilupperà un modello ad elementi finiti più accurato, con l'intento di definire delle linee guida per la loro futura progettazione.